

СИСТЕМА ПИТАНИЯ БОРТОВОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЗОВ 2ТЭ10М

ВВЕДЕНИЕ. Совместно с НПП «Трансмаш» (г. Луганск) в 2013 г. начаты проектные работы по модернизации тепловозов 2ТЭ10М горно-обогатительного комбината ПАО «Центральный ГОК» (г. Кривой Рог). Предлагается использовать высокооборотный (1800 об/мин) экономичный дизель САТ3512ВНД фирмы Caterpillar и заменить тяговый генератор (ТГ) постоянного тока ГП-311Б синхронным генератором ГС570УХЛ2. Это влечет изменение схемы возбуждения ТГ и питания собственных нужд (ПСН), которое будет производиться от вспомогательного (ВГ) синхронного генератора ГС1102УХЛ2, питание потребителей переменного тока – непосредственно от трехфазной обмотки ВГ, а потребителей постоянного тока – от полупроводниковых преобразователей (ПП). Для эффективной работы потребителей переменного тока системой возбуждения ВГ поддерживается заданное соотношение напряжение/частота на всех частотах вращения дизеля. Это обуславливает широкий диапазон (1:3) изменения входного трехфазного напряжения для источников ПСН постоянного тока.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. Для тяговых электрических машин постоянного тока (в т.ч. выпрямленного многофазного) ГОСТ 2582-81 устанавливает коэффициент пульсаций тока не более 10%. К источникам питания бортовой сети Заказчик предъявляет требования: напряжение – 110 ± 1 В, коэффициент пульсаций напряжения – не более 0,5%.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ – гармонический анализ выпрямленных напряжений и токов системы «источник питания – фильтр – нагрузка», определение коэффициентов пульсаций в рабочем диапазоне линейного напряжения ВГ и выбор фильтров для подавления пульсаций до требуемого уровня в источниках питания мотор-компрессора (ИПМК) и бортовой сети (ИПБС).

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Схема ИПМК включает в себя обмотку ПСН и цепей возбуждения ВГ, источник питания (унифицированный тиристорный преобразователь УТП-600У2), электродвигатель постоянного тока смешанного возбуждения (ДПТСВ) типа 2П2КМ, дроссели Д-30У2 на стороне переменного тока с индуктивностью каждой фазы $(6 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$ Гн, снижающие взаимное влияние преобразователей при их совместной работе (рис. 1).

При моделировании использованы программные расширения Simulink, Simpowersystem, графический инструмент FFT Analysis. Нелинейность кривой намагничивания ДПТСВ не учитывалась, суммарный магнитный поток возбуждения машины принят номинальным.

Технические характеристики двигателя 2П2КМ [1]: $P_H = 37$ кВт, $n_H = 1700$ об/мин, $U_H = 110$ В, $I_{ЯН} = 390$ А, $I_{ВН} = 10$ А, режим работы – S3 = 60%.

Расчет L-фильтра выполнен для основной гармоники при угле регулирования $\alpha = \alpha_{MAX}$ (наихудшее качество выпрямленного тока) и работе ПП с максимальным напряжением статорной обмотки ВГ.

В симметричной мостовой схеме амплитуда основной 6-й гармоники напряжения U_{d6} , В [2]:

$$U_{d6} = 1,35 U_{Л} \cdot \frac{2 \cdot \cos \alpha}{(kp)^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + (kp)^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (1)$$

где k – кратность гармоники, $k = 1$; p – пульсность ПП, $p = 6$; α – угол регулирования, при $U_{Л} = 270$ В и $f = 90$ Гц $\alpha = 72^\circ$.

Амплитуда 6-й гармоники напряжения U_{d6} при указанных условиях составляет 119,03 В.

Индуктивность сглаживающего L-фильтра

$$L_{CP} = \left(U_{d6} / \sqrt{2kp\omega_0} \Delta I_{дН} \right) - L_{Д}, \quad (2)$$

где ω_0 – круговая частота напряжения, $\omega_0 = 2\pi f = 565,2$ рад/с; $I_{дН}$ – номинальный выпрямленный ток, А; $L_{Д}$ – индуктивное сопротивление электродвигателя, $L_{Д} = 0,19 \cdot 10^{-3}$ Гн [1].

При заданном уровне пульсаций выпрямленного тока 5% и расчетной амплитуде 6-й гармоники U_{d6} получим $L_{CP} = 1,08$ мГн. В ходе моделирования значение индуктивности L-фильтра скорректировано и принято $L_{CP} = 1,5$ мГн.

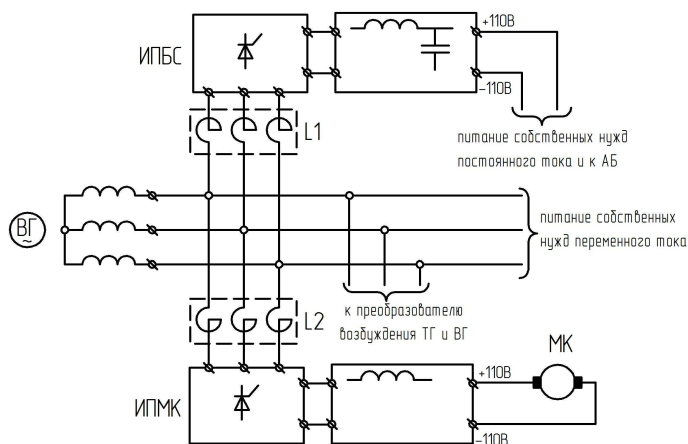


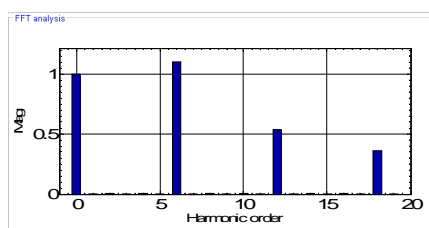
Рисунок 1 – Схема питания собственных нужд модернизируемого тепловоза 2ТЭ10М

Для ИПБС мощностью до 25 кВт для требуемого коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения и рассчитанной ранее амплитуде 6-й гармоники получены параметры LC-фильтра: $L = 3$ мГн, $C = 30$ мФ.

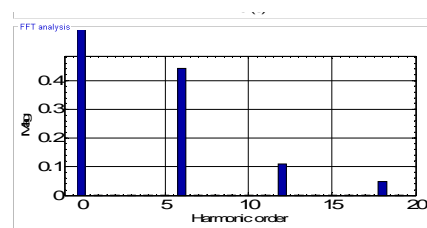
Гармонические составляющие токов и напряжений в цепи нагрузки ИПМК с L-фильтром и ИПБС с LC-фильтром для частот 30...90 Гц и входного линейного напряжения 90...270 В представлены в таблице 1. На рис. 2-3 представлен спектральный состав выпрямленных напряжений и токов ИПМК при $U_{\text{л}} = 270$ В, $f = 90$ Гц.

Таблица 1 – Величины токов и напряжений на сторонах переменного и постоянного тока с учетом токоограничивающих дросселей L_F и сглаживающих L-фильтра для ИПМК и LC-фильтра для ИПБС

Линейное действующее напряжение $U_{\text{ЛД}}$, А	90	180	270
Частота напряжения f , Гц	30	60	90
Угол α , °	20	62	72
Система питания	ИПМК	ИПБС	ИПМК
Фильтр	L	LC	LC
Амплитуда напряжения $U_{\text{АВ}}$, В	127,28	127,28	254,56
Амплитуда напряжения на входе ПП $U_{\text{ЛА}}$, В	125,07	127,1	252,15
Действующее напряжение на входе ПП $U_{\text{ЛД}}$, В	88,43	89,87	178,3
Амплитуда фазного тока $I_{\text{ФА}}$, А	445,42	250,48	424,34
Действующий ток $I_{\text{ФД}}$, А	315	177,1	300,1
Постоянная составляющая выпрямл. напряжения $U_{\text{д0}}$, В	107,61	109,82	108,89
Амплитуда 6-й г-ки выпрямл. напряжения $U_{\text{д6}}$, В	16,44	15,84	73,49
Коэффициент пульсаций напряжения по 6-й г-ке $K_{\text{ПУ6}}$	0,15	0,14	0,67
Постоянная составляющая выпрямленного тока $I_{\text{д0}}$, А	394,71	226,99	384,71
Амплитуда 6-й г-ки выпрямленного тока $I_{\text{д6}}$, А	8,86	4,7	19,21
Коэффициент пульсаций тока по 6-й г-ке $K_{\text{П6}}$	0,02	0,02	0,05
Постоянная составляющая филтр. напряжения $U_{\text{д0}}$, В	106,57	109,86	109,05
Амплитуда 6-й г-ки филтр. напряжения $U_{\text{д6}}$, В	1,86	0,14	8,37
Коэффициент пульсаций напряжения по 6-й г-ке $K'_{\text{ПУ6}}$	0,02	~ 0	0,08

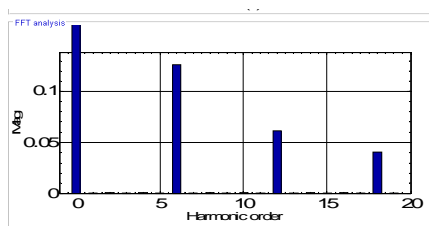


а)

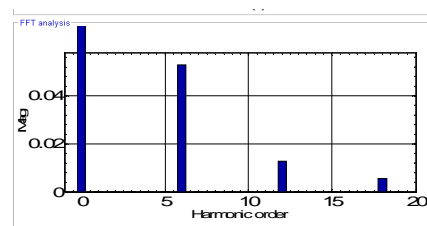


б)

Рисунок 2 – Спектрограммы выпрямленного напряжения U_d (а) и тока I_d (б) при отсутствии L-фильтра



а)



б)

Рисунок 3 – Спектрограммы выпрямленного напряжения U_d (а) и тока I_d (б) с рассчитанным L-фильтром

При анализе результатов исследований (табл.1, рис. 2, 3) установлено, что кривые выпрямленных напряжений и токов содержат 6,12,18-ые гармоники; введение L и LC-фильтров существенно уменьшает коэффициент пульсаций. Переходные процессы основных координат электропривода МК (рис. 4-6) получены при наличии L-фильтра и плавном открытии тиристоров для $U_{\text{л}} = 270$ В, $f = 90$ Гц. Ограничение тока двигателя определено допустимой перегрузкой $\lambda_1=4$ и данными пускового тока двигателя 2П2КМ тепловоза 2ТЭ116УД, не превышающими 1000А.

Во избежание значительных токовых перегрузок электродвигателя МК тепловоза 2ТЭ10М в момент запуска обеспечивается плавное нарастание выходного напряжения источника питания до 110В в течение 3с.

В настоящее время для электропривода МК ведется синтез замкнутой системы автоматического регулирования МК по контурам выпрямленного напряжения и тока с функциями стабилизации напряжения питания электродвигателя и ограничения пускового тока во всем диапазоне работы ВГ.

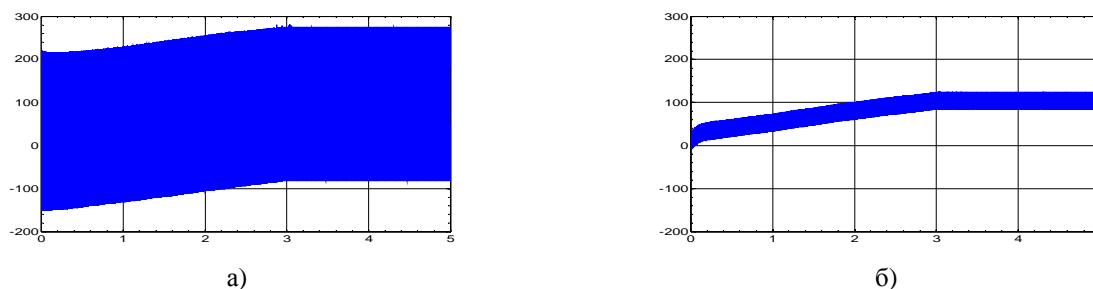


Рисунок 4 – Переходные процессы выпрямленного напряжения U_d в силовой цепи до (а) и после фильтра (б)

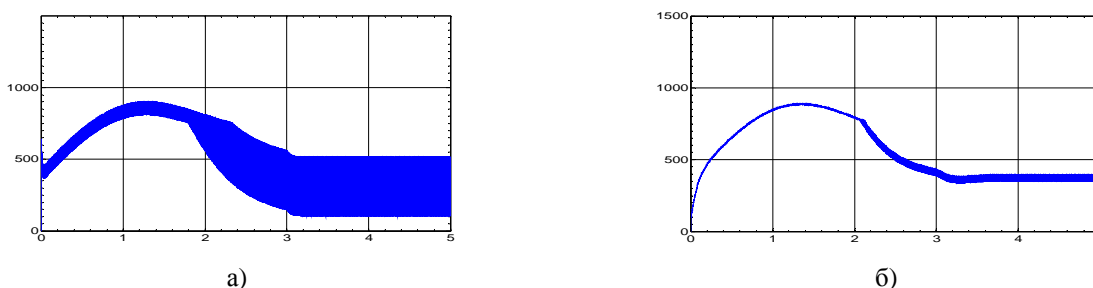


Рисунок 5 – Переходные процессы выпрямленного тока I_d без (а) и с введением в силовую цепь фильтра (б)

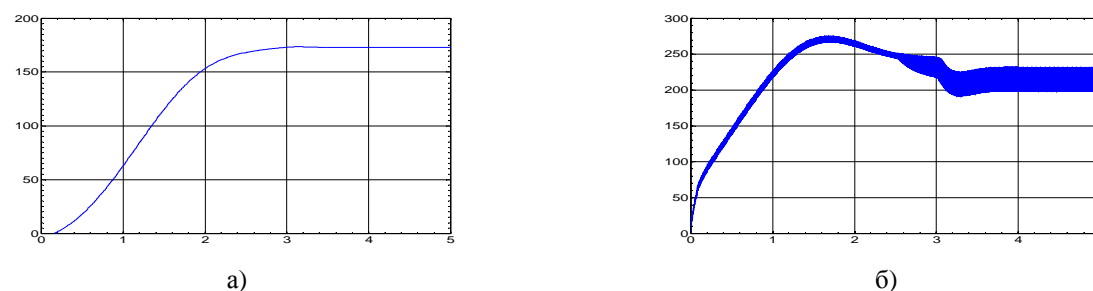


Рисунок 6 – Переходные процессы скорости ω (а) и момента M (б) с выходом на номинальную скорость 178 с^{-1}

ВЫВОДЫ. Для электропривода МК:

- рассмотрено влияние индуктивности источника питания на выпрямленные значения напряжений и токов;
- для сглаживания пульсаций выпрямленного тока выбран L-фильтр на основе соединенных параллельно двух реакторов Р-20У2 с общей индуктивностью $(1,5 \pm 0,15) \text{ мГн}$;
- уменьшены коэффициенты пульсаций по напряжению $K_{\text{пу}6}$ с 1,1 до 0,126 и току $K_{\text{пи}6}$ с 0,47 до 0,05, что соответствует требованиям по ограничению пульсаций тока на уровне 7% во всех режимах работы;
- полученные при расчете и моделировании значения 6-й гармоники напряжения практически совпадают (в расчете $U_{d6} = 119,03 \text{ В}$, при моделировании $U_{d6} = 119,11 \text{ В}$);
- установка L-фильтра с индуктивностью более $2,5 \text{ мГн}$ приводит к тому, что отношение механической и электромагнитной постоянных времени цепи фильтр–двигатель становится меньше 4 ($T_M/T_\Sigma < 4$) и характер переходных процессов становится колебательным;
- для ограничения пускового тока двигателя реализовано плавное увеличение напряжения в течение 3с при плавном изменении угла регулирования тиристоров.

Для системы ИПБС:

- выбран сглаживающий LC-фильтр на основе реактора Р-20У2 индуктивностью $(3 \pm 0,3) \text{ мГн}$ и конденсаторной панели ПФ-40У2 емкостью 30 мФ;
- уменьшены значения коэффициентов пульсаций по напряжению $K_{\text{пу}6}$ и току $K_{\text{пи}6}$ с 1,01 до 0,001.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог электротехнической продукции ОАО «Электромашина» <http://www.electric-drive.ru/>;
2. Крупович В.И. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами/ под ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Самовера. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 416 с.